

Прочность и пластичность металлических и неметаллических композитов криогенного и аэрокосмического назначения

В. А. Лотоцкая, Ю. А. Похил, А. И. Телегон, С. М. Дергун

Специальное конструкторско-технологическое бюро по криогенной технике Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины, Харьков, Украина

Представлены результаты исследования механических свойств четырех групп металлических и неметаллических композиционных материалов в интервале температур 300...4,2 К. Установлены типы стекло- и углепластиков с максимально высокими прочностными и упругими характеристиками при низких температурах. Обнаружено снижение характеристик прочности боралюминия после термоциклирования в интервале температур 20...443 К. Показано, что оптимальным сочетанием механических и электрических характеристик обладают сверхпроводящие композиты с ультратонкими жилами, полученные методом гидроэкструзии без промежуточных отжигов.

Ключевые слова: металлические и неметаллические композиционные материалы, характеристики прочности, метод гидроэкструзии.

Введение. Композиционные материалы (металлические и неметаллические) с широким спектром сочетаемых компонентов различного строения (упрочненные частицами, волокнами, слоями) и соответственно эксплуатационных свойств обладают огромными потенциальными возможностями использования в многопрофильных конструкциях и приборах криогенно-вакуумной и аэрокосмической техники как в качестве конструкционных, так и функциональных материалов с заданными свойствами.

Стекло-, углепластики и металлические композиты, армированные бором, являются наиболее применяемыми конструкционными композиционными материалами аэрокосмического назначения. Их использование обеспечивает высокую удельную прочность и жесткость при различных типах деформации (растяжение, сжатие, изгиб) и необходимом уровне теплофизических характеристик.

Среди функциональных композиционных материалов, используемых в криогенно-вакуумной технике, в частности в криоэлектромашиностроении, следует выделить сверхпроводящие (СП) композиты. Эти материалы должны сочетать как высокие электрические и магнитные, так и наилучшие механические характеристики (пластичность, прочность) в области температур эксплуатации. Наиболее надежными являются композиты на основе таких ОЦК деформируемых сверхпроводников, как Ti-Nb. Композиты на основе этих сплавов представляют собой кабели, состоящие из десятков тысяч тонких СП волокон, запрессованных в медную матрицу.

Оптимизация (для работы в экстремальных условиях) композитов по комплексу механических и функциональных характеристик невозможна без получения систематических данных об их механических свойствах в широком интервале температур вплоть до сверхнизких.

В настоящем сообщении изучались механические свойства четырех групп промышленных конструкционных и функциональных композиционных материалов в широком интервале температур (300...4,2 К) при различных видах нагружения (растяжение, сжатие и изгиб) с целью получения абсолютных значений характеристик, установления общих закономерностей их изменения с температурой, выбора лучших материалов для работы в конкретных эксплуатационных условиях.

Материалы и методы исследования. Исследуемые композиты разделяли на четыре группы по типу сочетаемых материалов.

Первая группа – конструкционные неметаллические композиты, армированные стекловолокном: ВПС-7, ВПС-13, КАСТ-В и ДСВ. Наполнителем для стеклопластиков ВПС-7 и ВПС-13 служили соответственно стеклоткань Т-10 и объемная стеклоткань МТТС-2, 1. В качестве основы использовали эпоксидную смолу ЭДТ-10. Стеклопластики КАСТ-В и ДСВ армировали стекловолокном, связующим служили фенолформальдегидные смолы.

Вторая группа – конструкционные неметаллические композиты, армированные углеродными волокнами: КМУ-1л, КМУ-3л и КМУ-4л. Углепластики КМУ-1л и КМУ-3л изготавливали на основе углеродной ленты ЛУ-3 и связующих соответственно ЭТФ и 5-211Б, углепластик КМУ-4л – на основе волокна ЛУ-П0,2 и связующего ЭНФБ. Исследовали однонаправленные и ортогонально армированные образцы.

Третья группа – композит с металлической матрицей (алюминиевым сплавом АМг6 и неметаллическим армирующим компонентом – волокнами бора В диаметром 110 мкм (39 об.%)).

Четвертая группа – композиты с металлическими матрицей и армирующим компонентом: промышленные СП многожильные композиты НТ-50 – Cu-(Ti-Nb), полученные путем волочения с промежуточными отжигами (ВПО) при $T = 375^\circ\text{C}$, гидроэкструзией с такими же промежуточными отжигами (ГЭПО) или гидроэкструзией без промежуточных отжигов (ГЭ).

Механические свойства материалов исследовали в интервале температур 300...4,2 К при различных видах нагружения: одноосное растяжение, сжатие и изгиб (стекло- и углепластики); одноосное растяжение и изгиб (АМг6-В); одноосное растяжение (СП композиты). Для исследований на растяжение использовали образцы стекло- и углепластиков в форме лопаток с размерами рабочей части $60 \times 6 \times t$ мм ($t = 1,5...3$ мм), на сжатие и изгиб – в форме пластин размером $70 \times 20 \times t$ мм ($t = 1,5...3$ мм) и $l \times 20 \times t$ мм ($l = 20...50$ мм, $t = 1,5...3$ мм) соответственно. Для исследований на растяжение композита АМг6-В использовали образцы в форме лопаток с размерами рабочей части $35 \times 3 \times 1,5$ мм¹⁾, на изгиб – в форме пластин размером $50 \times 12 \times 1,5$ мм. Для испытаний на растяжение многожильных СП композитов использовали образцы длиной рабочей части 35 мм и диаметром $\varnothing 0,8...2,2$ мм. При растяжении и сжатии все композиты деформировали вдоль волокон, при изгибе – поперек волокон со скоростью деформации $1 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ на низкотемпературной разрывной машине МКР-1 конструкции

¹⁾ На концы образцов были напрессованы головки в форме лопаток из сплава АМг-6 и на торцах головок нарезана резьба для крепления захватов.

Специального конструкторско-технологического бюро по криогенной технике Физико-технического института низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины (СКТБ ФТИНТ) [1] и на разрывной машине FPZ-100/1, снабженной низкотемпературной приставкой конструкции СКТБ ФТИНТ [2]. Особенности деформирования тонких проволоочных образцов СП композитов приведены в [3].

Образцы композита АМг6-В подвергали термоциклированию (30 цикл) в интервале температур $20 \Leftrightarrow 443$ К и определяли механические характеристики в условиях одноосного растяжения до и после термоциклирования.

Для неметаллических композитов первой и второй групп при всех видах нагружения (растяжение, сжатие и изгиб) также определяли модули упругости статическим методом с использованием тензометров конструкции СКТБ ФТИНТ, работающих в условиях низких температур [4, 5]. Описание эксперимента приведено в [5].

Каждая точка на температурных зависимостях полученных механических характеристик соответствует среднему значению по данным испытания трех–пяти образцов. Для уменьшения разброса данных модуль упругости определяли на одном образце во всем исследуемом температурном интервале, затем такой же цикл измерений повторяли на следующих образцах.

Результаты и их обсуждение. Стеклопластики. На рис. 1 представлены температурные зависимости максимальных напряжений в момент разрушения (разрушающее напряжение) σ_p ²⁾ и модуля Юнга E исследованных стеклопластиков при растяжении, сжатии и изгибе. Сравнивая полученные зависимости $\sigma_p(T)$ при различных видах нагружения, можно выделить общую закономерность – возрастание разрушающего напряжения при понижении температуры до 77 К. Причем для всех стеклопластиков значения σ_p в основном увеличиваются именно в этом интервале температур. При понижении температуры до 20 К указанные значения продолжают возрастать для стеклопластика ВПС-7 при всех видах нагружения и для ВПС-13 – при растяжении и сжатии. Для остальных материалов и видов нагружения при температуре 20 К наблюдается уменьшение σ_p . С понижением температуры от 20 до 4,2 К характер кривых $\sigma_p(T)$ для всех материалов изменяется на противоположный. При всех видах нагружения с понижением температуры до 20 К модули упругости стеклопластиков увеличиваются, в большинстве случаев эта тенденция сохраняется до температуры 4,2 К. Следует отметить большой разброс значений E от образца к образцу для каждого из стеклопластиков, особенно в интервале температур 20...4,2 К, где он составляет $\pm(5...12)\%$, что может быть обусловлено структурной неидентичностью образцов. Таким образом, наилучшими характеристиками обладает стеклопластик ВПС-7, у которого стабильно отмечаются максимальные значения σ_p и E при всех температурах и видах нагружения. В интервале температур 300...4,2 К разрушающее напряжение σ_p возрастает в 2–2,5 раза, модуль упругости – в $\sim 1,3$ раза при всех видах нагружения.

²⁾ Согласно ГОСТ 11262-80, ГОСТ 4651-82 и ГОСТ 27380-87 основной прочностной характеристикой неметаллических композитов, не обнаруживающих заметной пластической деформации, является разрушающее напряжение σ_p , определяемое как нагрузка, при которой разрушился образец, отнесенная к площади первоначального поперечного сечения образца.

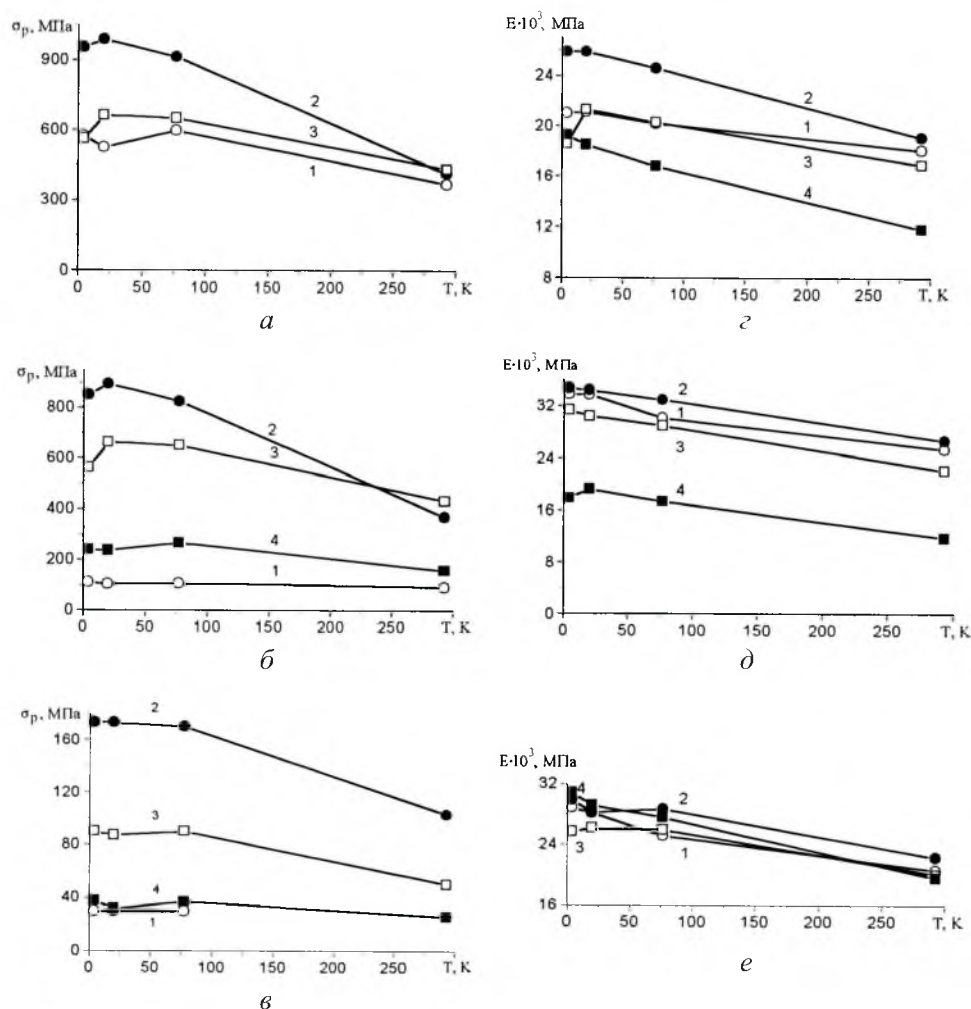


Рис. 1. Температурные зависимости разрушающих напряжений σ_p (а-в) и модуля упругости E (г-е) стеклопластиков КАСТ-В (1), ВПС-7 (2), ВПС-13 (3) и ДСВ (4) при растяжении (а, г), сжатии (б, д) и изгибе (в, е).

Углепластики. Зависимости $\sigma_p(T)$ и $E(T)$ для углепластиков при различных видах нагружения представлены на рис. 2. В отличие от стеклопластиков, для углепластиков не наблюдается общей тенденции повышения разрушающего напряжения σ_p с понижением температуры как в относительно “высокотемпературном” интервале 300...77 К, так и в области более низких температур. Только при изгибе (рис. 2,в,е) большинство как однонаправленных, так и ортогонально армированных образцов (КМУ-1Л, КМУ-3л) обнаруживают увеличение σ_p с понижением температуры до 77 К. При сжатии одинаково армированные углепластики ведут себя аналогично вплоть до 4,2 К. С понижением температуры разрушающее напряжение σ_p у однонаправленных углепластиков в основном возрастает, у ортогонально армированных – медленно понижается. Максимальные абсолютные значения σ_p в исследованном интервале температур при растяжении, сжатии и изгибе наблюдаются у однонаправленных углепластиков, за исключением углепластиков

тика КМУ-4л при изгибе, разрушающее напряжение которого существенно ниже.

Значения модулей упругости всех трех марок углепластиков при растяжении, сжатии и изгибе слабо зависят от температуры. В большинстве случаев наблюдается слабый рост значений E или их стабильность с понижением температуры от 300 до 77 К. В интервале температур 77...4,2 К при растяжении и сжатии значения модуля упругости в основном уменьшаются, при изгибе – увеличиваются, по крайней мере, в интервале температур 77...20 К. Общей закономерностью зависимостей $E(T)$ являются также существенно большие значения модулей упругости однонаправленных углепластиков (на 30...60%) по сравнению с ортогонально армированными. В каждой из групп углепластиков с одинаковым типом армирования значения модулей упругости и их температурные зависимости достаточно близки.

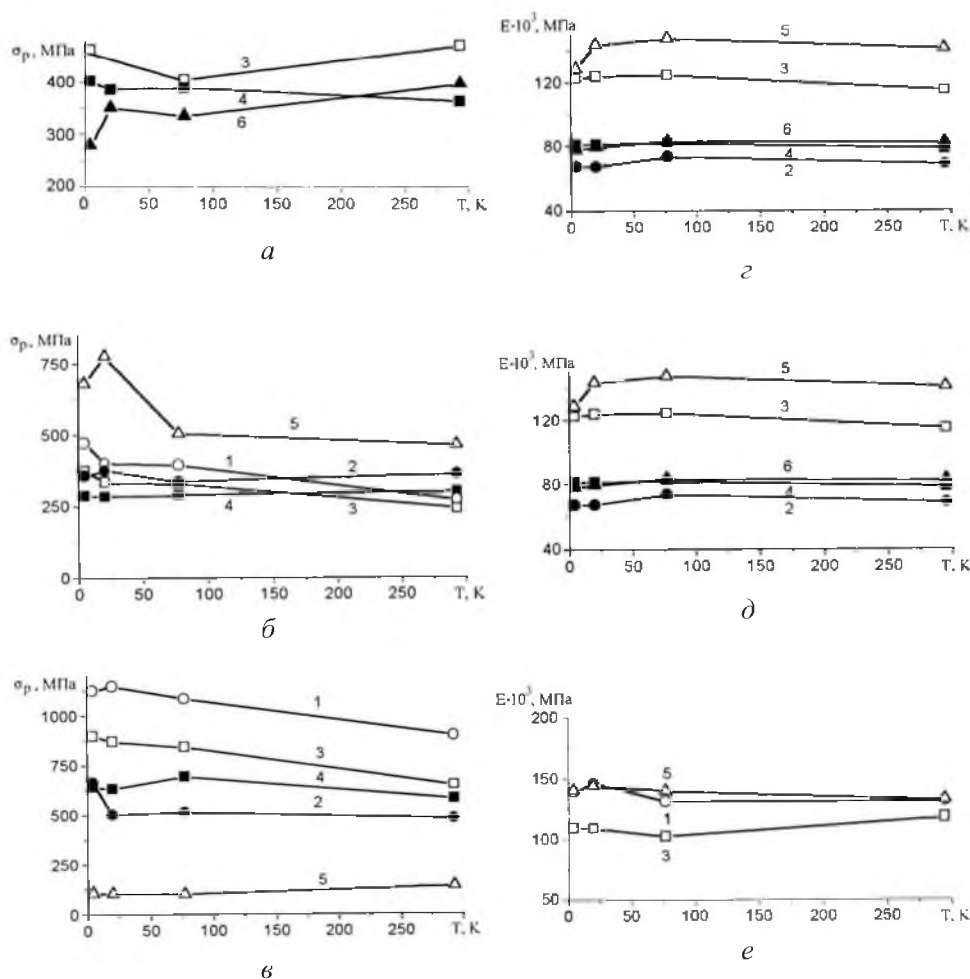


Рис. 2. Температурные зависимости разрушающих напряжений σ_p (а-в) и модуля упругости E (з-е) углепластиков КМУ-1л (1, 2) [6], КМУ-3л (3, 4) [6] и КМУ-4л (5, 6) при растяжении (а, з), сжатии (б, д) и изгибе (в, е): 1, 3, 5 – однонаправленные; 2, 4, 6 – ортогонально армированные.

Оптимальными характеристиками при всех видах деформирования в интервале температур 300...4,2 К не обладает ни один из исследованных углепластиков. В условиях растяжения наиболее высокие характеристики имеет углепластик КМУ-3л, при сжатии – КМУ-4л, при изгибе – КМУ-1л.

Сравнение данных механических испытаний (σ_p и E) исследованных стекло- и углепластиков показывает, что для использования в конструкциях, работающих при растяжении, можно рекомендовать стеклопластик ВПС-7, при сжатии – углепластик КМУ-4л и стеклопластик ВПС-7, при изгибе – углепластики КМУ-1л и КМУ-3л.

Алюминиевый сплав с волокнами бора – АМг6-В. На рис. 3 представлены зависимости $\sigma_p(T)$ композита АМг6-В, деформированного в условиях одноосного растяжения и изгиба.

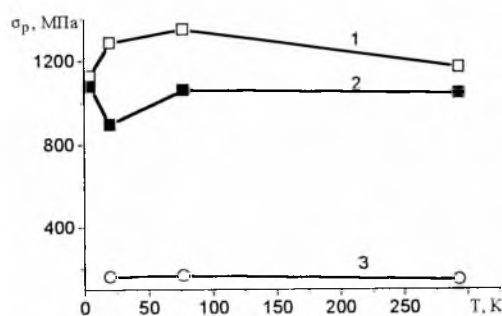


Рис. 3. Температурные зависимости разрушающих напряжений композита АМг6-В при растяжении в исходном состоянии (1), после термоциклирования (2) и при изгибе (3).

Из рассматриваемых конструкционных композитов боралюминий обнаруживает самые высокие значения напряжения разрушения в интервале температур 300...4,2 К. Максимальной прочностью (1350 МПа) боралюминий обладает при 77 К. Дальнейшее охлаждение образцов приводит к некоторому уменьшению значений σ_p (до 1127 МПа) при 4,2 К. Термоциклирование в интервале температур 20...443 К вызывает снижение разрушающего напряжения во всем исследованном интервале температур, особенно при 77 и 20 К (на 20 и ~30% соответственно). На некоторых образцах после термоциклирования наблюдалось расслоение по границам раздела компонентов, что говорит о недостаточной прочности связи волокно–матрица. Заметный вклад в уменьшение прочности связи вносят, по-видимому, термические напряжения, развивающиеся в боралюминии из-за значительной разницы в коэффициентах термического расширения матрицы и волокна ($\sim 24 \cdot 10^{-6}$ и $\sim 4,9 \cdot 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$ соответственно). Кроме того, причиной снижения прочности матрицы являются рост зерна при нагреве до 443 К и коагуляция вторых фаз по границам зерен.

О недостаточной прочности связи волокно–матрица свидетельствуют также низкие значения напряжения разрушения при изгибе. В интервале температур 300...20 К они остаются на уровне $\sim 150...160$ МПа.

Для выяснения причин сложного поведения боралюминия и неметаллических композитов при низких температурах необходимо дальнейшее исследование прочности связи волокно–матрица, характера разрушения ком-

позита, а также термических напряжений, возникающих в компонентах при захлаживании, и др.

Сверхпроводящие многожильные композиты НТ-50. Эксплуатационные характеристики СП композитов определяются оптимальным сочетанием электрических и механических свойств, которые, в свою очередь, являются взаимосвязанными. При захлаживании и запуске тока в СП обмотках мощных магнитных систем возникают значительные механические, термо- и магнитомеханические напряжения. Недостаточная прочность и пластичность СП композитов может приводить к разрушению отдельных жил, локальному разогреву и, как следствие, к необратимой деградации электрических параметров СП обмотки. Соответственно к ним предъявляются требования сохранения высокой прочности и ненулевой пластичности (отсутствие охрупчивания) в области рабочих температур (4,2...10 К).

Особенности кристаллического строения и структурного состояния компонентов металлических композитов НТ-50 следующие. Медная матрица обладает ГЦК кристаллической решеткой и тенденцией к увеличению пластичности с понижением температуры, армирующий СП компонент (сплав Ti-50%Nb) – ОЦК решеткой и обнаруживает резкое снижение пластичности с понижением температуры [7]. Кроме того, компоненты имеют разную фазовую стабильность: медь – структурно-стабильная, а СП компонент – метастабильный, при низких температурах претерпевает псевдоупругое деформационное мартенситное превращение $\beta \Leftrightarrow \alpha$, область протекания которого зависит от приложенного напряжения и температуры [8].

Исследование механических свойств (предел прочности $\sigma_{\text{в}}^3$) и относительное удлинение δ) композитов НТ-50, полученных по различным технологиям и с разными технологическими параметрами, показало следующее. В отличие от неметаллических композитов, на кривых $\sigma(\varepsilon)$ всех композитов НТ-50 в интервале температур 300...4,2 К наблюдается стадия пластической деформации. При разгрузке, начиная с напряжения, составляющего $(2/3...3/4)\sigma_{\text{в}}$, у композитов типа ГЭ наблюдается заметная (до 1%) псевдоупругая деформация. Во всех случаях относительное удлинение δ композитов на порядок и более выше, чем отдельных СП жил [8]. Температурные зависимости механических характеристик композитов, полученных путем ВПО, обнаруживают снижение прочности и особенно пластичности в области температур эксплуатации 9,5...4,2 К (рис. 4) [3]. Изменение таких технологических параметров, как вид конечной обработки (воложение вместо отжига), отсутствие или наличие твистирования при близких коэффициентах заполнения сверхпроводником K_3 в диаметрах жил, не влияет на качественный характер зависимостей $\delta(T)$ – рис. 4,б [9]. Этот эффект наблюдается и в композитах с различными значениями коэффициента заполнения сверхпроводником K_3 (18,4 и 41,7%) при близких диаметрах жил (20 и 10 мкм соответственно) – рис. 5. Изменение вида механической обработки

³⁾ Сверхпроводящие композиты, в отличие от неметаллических, пластически деформируются и практически во всем исследованном интервале температур имеют кривую деформации с максимумом. Это позволило измерять стандартную характеристику – предел прочности $\sigma_{\text{в}}$, представляющий собой напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, которая предшествует разрушению образца согласно ГОСТ 22706-77.

(гидроэкструзия вместо волочения), как видно из рис. 5, при использовании технологии с промежуточными отжигами также не предотвращает охрупчивания композитов в области температур эксплуатации. Увеличение K_3 или твистирование, как и следовало ожидать, снижает пластичность композитов.

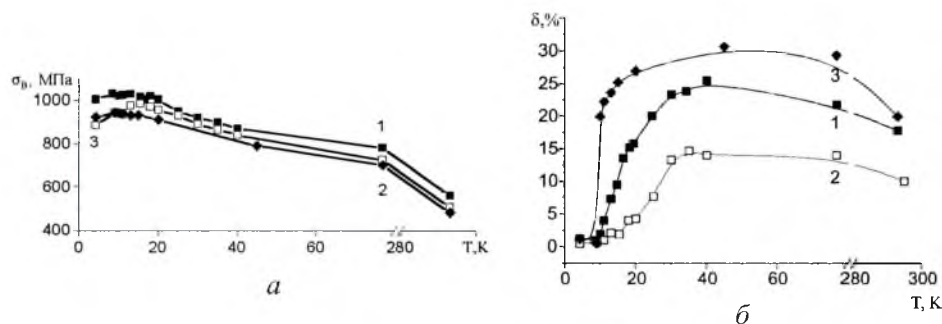


Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности σ_b (а) и относительного удлинения δ (б) композитов НТ-50: 1 – нетвистированный, $K_3 = 25\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 70$ мкм, ВПО, конечная обработка – волочение; 2 – тот же композит с конечной обработкой – отжиг при 648 К (375°C); 3 – твистированный – $1/150$ оборот/м $\cdot 10^3$, $K_3 = 27\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 120$ мкм, ВПО, конечная обработка – волочение [5].

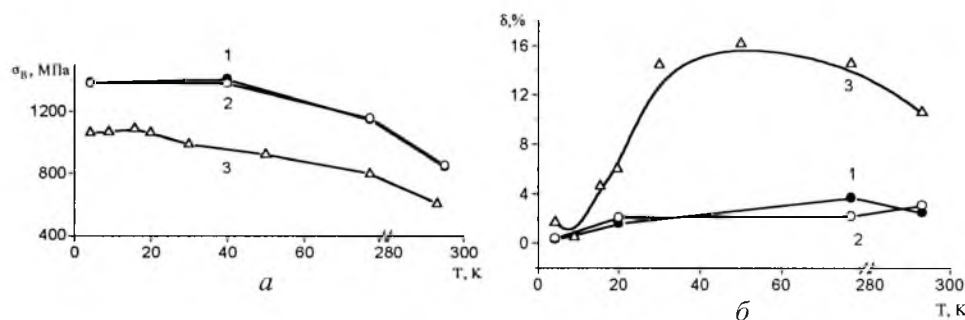


Рис. 5. Температурные зависимости предела прочности σ_b (а) и относительного удлинения δ (б) нетвистированных композитов НТ-50: 1 – $K_3 = 43,1\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 10$ мкм, ВПО, конечная обработка – волочение; 2 – $K_3 = 41,7\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 10$ мкм, ГЭПО, конечная обработка – волочение; 3 – $K_3 = 18,4\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 20$ мкм, ВПО, конечная обработка – волочение [9, 10].

Для объяснения резкого снижения относительного удлинения δ и уменьшения предела прочности σ_b композитов НТ-50 в области температур эксплуатации было проанализировано несколько возможных причин: подавление матрицей поверхностных сбросов, обусловленных развитием двойникования или мартенситного превращения в СП жилах; переход от вязкого к хрупкому разрушению и соотношение между прочностными и пластическими свойствами матрицы и армирующих СП жил. С этой целью исследовались механические свойства и структурное состояние СП жил [7, 8], характер разрушения композитов [9, 10], механические и структурные свойства модельного структурно-стабильного биметалла Cu–Nb [11]. Это позволило установить, что критерием повышения пластичности композитов в области гелиевых температур является соотношение между прочностными и

пластическими свойствами компонентов. Технологии изготовления композитов путем волочения или гидроэкструзии с применением промежуточных отжигов не обеспечивают упрочнения медной матрицы, достаточного для того, чтобы воспрепятствовать усилению резко выраженной локализации пластической деформации ОЦК компонента, характерной при температуре ниже 20 К [11]. В результате деформация композита происходит в данном локальном сечении вплоть до разрушения СП жилы ($K_3 \sim 18...27\%$) или всего композита в целом ($K_3 \sim 41\%$).

На рис. 6 приведены температурные зависимости предела прочности σ_B и относительного удлинения δ композита с ультратонкими жилами, полученного путем гидроэкструзии без промежуточных отжигов и волоченного с промежуточными отжигами при $K_3 = 18,4$ и $19,4\%$ соответственно. Увеличение пластичности гидроэкструдированного композита в области гелиевых температур обусловлено получением существенно упрочненной матрицы благодаря изменению технологии изготовления, а именно: отсутствию промежуточных отжигов и уменьшению как диаметра жил на два порядка, так и толщины матричных слоев внутри одного пакета СП жил⁴⁾. Свидетельством упрочнения матрицы гидроэкструдированного композита является увеличение предела текучести матрицы, определявшегося как напряжение окончания первой линейной стадии деформирования композита, соответствующей упругой деформации обоих компонентов [5], по сравнению с ВПО композитом.

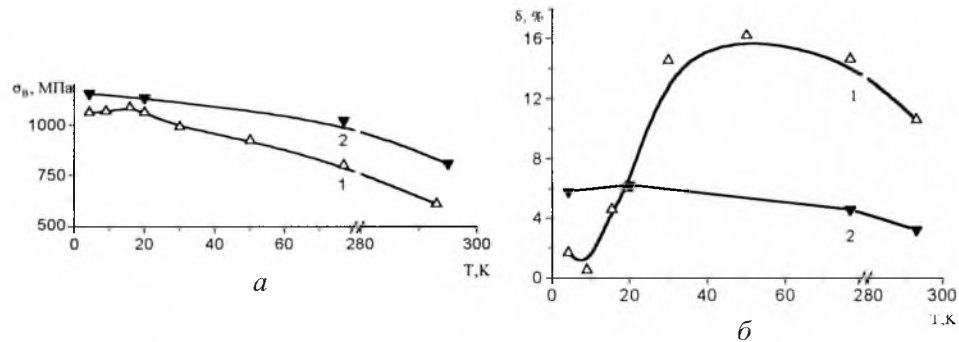


Рис. 6. Температурные зависимости предела прочности σ_B (а) и относительного удлинения δ (б) нетвистированных композитов НТ-50: 1 – $K_3 = 18,4\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 20$ мкм, ВПО, конечная обработка – волочение; 2 – $K_3 = 19,4\%$, $\varnothing_{\text{жилы}} = 0,1$ мкм, ГЭ [11].

Повышение несущей способности матрицы обеспечивает подавление локализации пластической деформации СП жил при низких температурах и связанное с ним их преждевременное разрушение (установлено методом растровой электронной микроскопии [5]) из-за передачи усилия упрочненной матрице. В дальнейшем пластическая деформация композита распространяется вдоль оси образца в новое сечение. Таким образом, она распространяется на большую, чем в случае ВПО композита, часть рабочей длины

⁴⁾ Диспергирование приводит к дополнительному упрочнению матрицы вследствие повышения плотности дислокаций в процессе ГЭ, обусловленного большой плотностью межфазных границ.

образца. Другими словами, упрочненная матрица обеспечивает более однородную деформацию, что приводит к повышению макропластичности композита.

Полученные результаты дают основание считать оптимальной технологию получения промышленных композитов (Cu–Ti–Nb) с ультратонкими жилами (0,1 мкм) путем гидроэкструзии без промежуточных отжигов. Ранее [11] было показано, что эти композиты в области рабочих гелиевых температур обеспечивают также максимальные для этого типа сверхпроводников плотности критического тока $2,5...3 \cdot 10^9$ А/м² в поперечном магнитном поле 5 Тл при 4,2 К.

Выводы

1. В интервале температур (300...4,2 К) получены базовые данные по механическим свойствам композиционных материалов, принадлежащих к четырем наиболее широко применяемым в криогенной технике типам композитов.

2. Накопленный экспериментальный материал позволяет обоснованно выбрать конструкционные материалы с оптимальным уровнем удельных характеристик прочности и жесткости для работы при низких температурах с различными типами нагружения.

3. Установлено, что оптимальное сочетание эксплуатационных (электрические и механические) характеристик СП композитов достигается в композитах с ультратонкими жилами, получаемых путем гидроэкструзии без промежуточных отжигов. Высокий уровень низкотемпературной пластичности таких композитов определяется повышением макроскопической однородности деформации за счет подавления локализации деформации ОЦК-армирующих волокон упрочненной ГЦК-матрицей.

Резюме

Наведено результати дослідження механічних властивостей чотирьох металічних і неметалічних композиційних матеріалів в інтервалі температур 300...4,2 К. Установлено типи скло- та вуглепластиків із максимально високими характеристиками міцності і пружності за низьких температур. Виявлено зниження характеристик міцності боралюмінію після термоцикування в інтервалі температур 20...443 К. Показано, що оптимальне поєднання механічних та електричних характеристик мають надпровідні композити з ультратонкими жилами, що отримані методом гідроекструзії без проміжного відпалу.

1. *Зиновьев М. В., Медько Г. С., Подкуйко В. П.* Установка для исследования прочности при низких температурах // Пробл. прочности. – 1974. – № 7. – С. 95 – 98.
2. *Воликова Л. М., Чернецкий В. К.* Низкотемпературная приставка к разрывной машине 123У10 // Прикладное криогенное и вакуумное материаловедение / Под ред Ф. Ф. Лаврентьева. – Киев: Наук. думка, 1991. – С. 137 – 143.

3. Ильичев В. Я., Лотоцкая В. А. Прочность и пластичность кабелей НТ-50 при низких температурах // Пробл. прочности. – 1980. – № 5. – С. 61 – 65.
4. Мокрый Н. И., Чернецкий В. К. Устройства для измерения деформации образцов материалов при низких температурах // Прикладное криогенное и вакуумное материаловедение / Под ред Ф. Ф. Лаврентьева. – Киев: Наук. думка, 1991. – С. 129 – 137.
5. Чернецкий В. К., Мокрый Н. И., Ильичев В. Я. и др. Приспособления для определения прочности, деформационных характеристик и модулей упругости листовых материалов при низких температурах // Завод. лаб. – 1979. – 45, № 11. – С. 1052 – 1055.
6. Ильичев В. Я., Владимирова В. Л., Телегон А. И. Механические свойства углепластиков при низких температурах // Механика композиционных материалов. – 1981. – № 4. – С. 723 – 726.
7. Похил Ю. А., Лотоцкая В. А., Лаврентьев Ф. Ф. и др. Особенности пластической деформации и разрушения кабелей НТ-50 // Физика металлов и материаловедение. – 1987. – 64, вып 3. – С. 549 – 553.
8. Lototskaya V. A., Pokhil Yu. A., and Lavrentev F. F. Role of martensite transformation in variation of physicomachanical properties of Nb–Ti (45 and 50 wt% Nb) alloys at low temperatures // Cryogenics. – 1993. – 33, No. 7. – P. 692 – 694.
9. Лотоцкая В. А., Похил Ю. А., Ильичев В. Я. и др. Влияние технологии изготовления на характер разрушения кабелей НТ-50 // Физ.-хим. механика материалов. – 1988. – № 4. – С. 109 – 111.
10. Pokhil Yu. A., Lototskaya V. A., and Lavrentev F. F. Low temperature mechanisms of fracture of bcc-superconductors and BCC-superconductor-based composite // Cryogenics. – 1993. – 33, No. 11. – P. 1053 – 1057.
11. Лотоцкая В. А., Похил Ю. А. ОЦК-деформируемые сверхпроводники и композиты на их основе. Низкотемпературные механические свойства и структурные аспекты // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – 22, № 2. – С. 70 – 78.

Поступила 12. 06. 2003